

科 学 前 沿 丛 书

硅锗超晶格^①

Silicon-Germanium

Superlattices and

低维量子结构

Low Dimensional

Quantum Structures

盛 簾 蒋最敏 著
陆 昉 黄大鸣



上海科学技术出版社

科学前沿丛书

硅锗超晶格 及低维量子结构

盛 簏 蒋最敏 陆 昉 黄大鸣 著



上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

硅锗超晶格及低维量子结构/盛簋等著. —上海:上海科学技术出版社, 2004.8

(科学前沿丛书)

ISBN 7-5323-7540-4

I. 硅... II. 盛... III. 超晶格半导体—半导体物理学—研究 IV. 0471.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 055426 号

责任编辑

赵玲丽 戴雪文 张 晨

世纪出版集团 出版发行

上海科学技术出版社

(上海瑞金二路450号 邮政编码200020)

新华书店上海发行所经销

上海新华印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 字数 288 000

印张 19.5 插页 4

2004年8月第1版

2004年8月第1次印刷

印数 1-1500

定价: 46.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

内 容 提 要

本书比较系统地介绍了 Si 分子束外延和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维量子体系研究工作的发展和一些新进展,并根据当前国际上的发展趋势,围绕复旦大学应用表面物理国家重点实验室过去十多年来所取得的各项研究成果,对 Si 分子束外延和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维量子体系的材料生长、表征、物理特性研究和器件应用等方面作了比较完整的介绍。

本书第 1 章介绍了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 体系的基本物理特性,第 2 章介绍了 Si 分子束外延设备、实时监测分析技术及各种类型的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 材料的外延生长技术,第 3 章介绍了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结材料的表征,第 4、5 章分别论述和介绍了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格和量子阱的电学和光学特性,同时也介绍了最新发展的 Si 基 Ge 量子点研究,第 6 章介绍了量子点的生长及其光学和电学特性,第 7 章介绍了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结材料在器件方面的应用。

本书可作为半导体物理、材料测试及器件制备等相关领域的研究人员及研究生的参考书。特别对于希望从事 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 材料、物理和器件研究的科学工作者,本书可作为一本入门的参考资料。

《科学》前沿丛书》序

人类文明发展的长河正浩浩荡荡地流向又一个千年,在世界格局的综合国力竞争中,基础研究的发展水平已经成为一个民族的智慧、能力和国家科学技术进步的基本标志之一。

基础研究是人类对未知世界的探求,它在各门学科的前沿上展开,以认识客观世界的物质结构、各种基本运动形态和运动规律为己任,它的重大发现常常带来社会生产的革命性变化。

基础研究在科学前沿向未知领域迈进的每一步,都有赖于创新,创新是基础研究的灵魂,而创新需要很高水平的理论思维。正如 19 世纪的一位伟人所说,一个民族想要站在科学的最高峰,就一刻也不能没有理论思维。

自然科学的理论来自关于自然现象和探索实践认识的总结。这种总结通过去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的过程,实现关于自然规律认识的飞跃,在人类认识自然的知识体系上编织出新的结点。这样的结点往往又是在新的高度编织下一个结点的支撑点。一个民族想要攀登到科学的最高峰,进行高水平的理论思维,既需要一批批科学家不懈地在科学前沿上探索,也需要他们不断地进行这种实现认识上飞跃的总结。

著书立说,对一个专题或一个领域的研究成果,进行去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的总结,使之系统化、理论化,是提高理论思维水平和持续创新能力的必须。在攀登科学高峰的历程中,一部好的基础科学学术著作常常能为众多继续向上攀登的人们提供一块坚实的 platform。因此,出版好基础性研究领域的学术著作,是一件十分有意义的工作。

《科学》杂志的编者和出版者,自 1915 年《科学》创刊以来,始终以传播科学为己任,在办好刊物的同时,积极地参与出版科学著作这件有意义的工作。在 20 世纪的最后五年,《科学》的出版者——上海科学技术

出版社推出了一套《**科学**专著丛书》，出版了 14 部专著，受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

我高兴地看到，在迎来 21 世纪之时，作为上述努力的继续，该社又推出这套《**科学**前沿丛书》，着重于从基础性研究的前沿交叉领域选题，出版学术著作。我期望，这套丛书的编者、作者和出版者能通力合作，通过自己的辛勤劳动，以一部部精心选题、精心著述、精心编辑、精心出版的著作，参与铺筑通向中国科学再度辉煌的大道！

周光召

（《**科学**》杂志编委会主编）

2001 年元旦

本书序

自从 1970 年江崎(L. Esaki)和朱兆样(R. Tsu)首先提出半导体超晶格概念以来,这一领域里的研究取得了惊人进展。这种完全由人工制备的新材料具有天然晶体材料所没有的许多性质,从而开辟了超晶格物理这一新的研究领域。而利用这种材料的独特性质研制出的新型器件,也使半导体器件的设计和制造由原先的“杂质工程”发展到“能带工程”的新范畴。因此,在半导体学界有不少人认为,超晶格的诞生是继晶体管发明后,半导体物理研究和半导体器件发展的又一新的里程碑。

早期在半导体超晶格方面的研究工作都集中在 GaAs/GaAlAs 材料体系,这是一种晶格匹配的材料体系。随着材料生长技术的飞速发展与完善,特别是应变超晶格概念的提出和应变层外延生长技术的成熟,其他各种类型的 III-V 族超晶格和非 III-V 族的 II-VI、IV-IV 族半导体超晶格也相继研制成功。

IV 族半导体 Si 是应用最广泛、工艺最成熟的半导体材料。作为大规模集成电路的基础材料,它的重要性是不言而喻的。它在微电子器件的市场占有率高达 95% 以上。但是,从半导体的固有特性来看, Si 并不是一种优秀的材料。由于 Si 的能带结构为间接能隙,发光效率极低,所以在光电子器件的领域中, Si 一直是无地位的。另外, Si 的室温电子迁移率也比 GaAs 约低五倍,因此在制备高速器件方面并不占有优势。随着 Si 分子束外延技术的趋向成熟和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格、量子阱等新型材料质量的日益完善,人们希望借助于能带工程,对 Si 基低维量子体系的电学和光学特性进行“裁剪”,发掘出崭新的物理现象,给予 Si 基材料以新的活力,孕育出新的生长点。近年来, Si 基光电子学已成为国内外学术界和产业界非常关注的一个热点。 Si 分子束外延和 Si 基低维量子体系在其中无疑占有极其重要的地位。

复旦大学应用表面物理国家重点实验室自 1986 年起就开始进行 Si

分子束外延和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维材料体系的研究,是国内在这一方面开展工作最早的单位。从 Si、Ge 分子束外延的生长技术,外延材料的实时检测技术,外延材料的表征,到 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格、量子阱和量子点等低维材料体系的电学、光学特性的研究,都做了大量工作。在器件研制方面,开展了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 内光电发射远红外探测器的研制,并与其他单位合作研制成多种光波导器件、非线性光器件以及 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区异质结双极型晶体管等。十多年来经过数十位教师和研究生的辛勤工作,积累了丰富的经验,也取得了丰富的成果。

编写这本书的是本实验室四位教授,他们长期从事 Si 分子束外延和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维量子体系特性的研究,有着第一手资料和亲身的心得体会。他们根据当前国际上的发展趋势,结合自己实验室的研究结果,比较系统完整地撰写了本书的内容,使它既能反映这一研究领域的概况,又具有自己的特色。

当前是信息技术飞速发展的年代,以 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维量子体系为代表的新型 Si 基微电子和光电子材料在将来的信息材料中面临重要的机遇。本书所阐明的许多内容,特别是很多基本概念、思想和方法,不仅对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变材料的研究,而且对其他新型 Si 基材料的研究也有一定的参考价值。希望本书的出版,能使对这一领域感兴趣的读者有所裨益。

复旦大学应用表面物理国家重点实验室

王 迅

2003 年 12 月

前 言

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格和低维材料是近年来发展起来的一种新型材料。由于异质结的能带排列和 Si 与 Ge 间的大晶格失配导致的应变改变了材料的各种物理特性,对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结超晶格和低维材料的研究丰富了半导体超晶格物理,也为 Si 材料在高速器件、光电器件领域里的应用开拓了新的前景。

本书主要根据当前国际上在 Si 分子束外延和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维量子体系研究方面的进展,结合复旦大学应用表面物理国家重点实验室过去十多年来在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结超晶格和低维材料方面的研究工作而撰写,力求使读者对这一研究领域的概况有较完整的了解。

本书共有七章。第 1 章介绍 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格和低维材料体系的基本物理特性、晶格失配体系中的应变、应变对异质结界面的能带排列的影响等。第 2 章介绍 Si 分子束外延系统、实时监测技术及各种类型的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 材料的外延生长技术。重点介绍失配体系材料的二维生长临界厚度以及用来实现逐层外延生长的反射式高能电子衍射强度振荡锁相外延技术。第 3 章为材料的表征,主要是最常用的 X 射线衍射分析,也介绍了最新的三晶衍射技术,另外还有透射电子显微观察等。第 4、5 章分别介绍 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格的电学和光学特性及其测试,同时也介绍了用深能级暂态谱学、导纳谱、拉曼 (Raman) 光谱和光致发光谱对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结、超晶格的电学和光学特性的研究。第 6 章是 Si 基 Ge 量子点的生长及其光学、电学特性。最后一章是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结制作的器件,主要介绍 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结内光电效应红外探测器的制作。

本书限于篇幅,许多领域的研究工作未能列入本书范围。此外,由于国际上在这方面的发展迅速,文献资料数量极多,无法罗列齐全,很

多重要的研究工作在书内仅能简单地提及,甚至被忽略,这只能在以后弥补。

作 者

2003 年 12 月

目 录

《科学前沿丛书》序	i
本书序	iii
前言	v
第 1 章 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 合金应变层及超晶格的基本性质	1
§ 1.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层内的应力	1
§ 1.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质材料的共度生长临界厚度	3
§ 1.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变层超晶格的应变特性	5
1.3.1 拉曼散射谱用于应变的测定	6
1.3.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的应力分布	8
1.3.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的应力大小	10
1.3.4 三维岛状生长的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的应变特性	11
1.3.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变层超晶格的应变弛豫和 Ge 的向外扩散	12
§ 1.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结构的能带排列	13
1.4.1 异质结构的能带排列	13
1.4.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变材料的带隙和能带结构	14
1.4.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质界面的能带排列	17
§ 1.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱和超晶格的电子态	20
1.5.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱和超晶格的能带结构	20
1.5.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变层量子阱的电子态	23
第 2 章 Si 分子束外延生长技术	28
§ 2.1 Si 分子束外延设备简介	28
2.1.1 真空系统	28

2.1.2	样品座、传递及加热装置	30
2.1.3	电子束蒸发系统	30
2.1.4	掺杂装置	31
2.1.5	实时检测装置	31
§ 2.2	原位分析与监控	31
2.2.1	反射式高能电子衍射技术	31
2.2.2	俄歇电子能谱定量分析方法	34
§ 2.3	分子束外延中衬底材料的表面处理技术	40
2.3.1	用薄氧化层获得 Si 清洁表面	40
2.3.2	Si 衬底 H 饱和钝化法	41
§ 2.4	Si、Ge 材料的外延生长	42
2.4.1	Si 在 Si 衬底上的同质分子束外延生长	42
2.4.2	Ge/Si(100)和 Ge/Si(111)异质外延生长	50
2.4.3	在 Si 衬底上外延生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金	54
2.4.4	Si_nGe_m 超薄层超晶格的外延生长	59
2.4.5	分子束外延生长温度的选择	62
2.4.6	$\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ 缓冲层的生长	63
第 3 章	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格、量子阱的结构表征	70
§ 3.1	X 射线散射和衍射	70
3.1.1	X 射线散射和衍射原理	71
3.1.2	小角 X 射线衍射	74
3.1.3	高角 X 射线衍射	87
3.1.4	X 射线表面散射	95
3.1.5	X 射线三轴(晶)衍射——二维倒空间测绘	98
§ 3.2	透射电子显微观察	102
3.2.1	横截面试样制备和显微观察	102
3.2.2	电子探针微区成分分析	105
§ 3.3	卢瑟福背散射谱	107
§ 3.4	俄歇电子能谱和二次离子质谱深度剖析	111

第 4 章 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 低维结构材料的电学性质	115
§ 4.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱结构的 $C-V$ 特性	115
4.1.1 $C-V$ 法测试的基本原理	116
4.1.2 量子阱结构的能带分布计算	118
4.1.3 量子阱结构的 $C-V$ 特性的模拟计算	122
4.1.4 量子阱样品的 $C-V$ 测试结果分析	131
§ 4.2 量子阱结构的导纳谱研究	134
4.2.1 导纳谱的等效电路模型	135
4.2.2 导纳谱的载流子热发射模型	137
4.2.3 单量子阱样品的实验结果	142
4.2.4 导纳谱的计算机模拟	145
4.2.5 外加直流偏压对导纳谱的影响	146
§ 4.3 用导纳谱研究 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子阱中的量子限制效应	147
4.3.1 导纳谱研究量子阱的原理	147
4.3.2 单量子阱的导纳谱研究	150
4.3.3 多量子阱的导纳谱研究	154
§ 4.4 用 DLTS 研究 Si 分子束外延层的界面缺陷	159
4.4.1 分子束外延层与衬底界面的缺陷研究	159
4.4.2 存在高密度界面缺陷层时外延样品的肖特基势垒的能带图	160
4.4.3 高浓度界面缺陷的深能级暂态谱特性	163
4.4.4 高密度界面缺陷的检测	166
4.4.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子阱结构的界面缺陷的研究	170
第 5 章 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结构和超晶格的光学特性	181
§ 5.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的光散射特性	181
5.1.1 Si 、 Ge 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的声子散射谱	181
5.1.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的折叠声子散射	187
5.1.3 有限尺寸效应和多重超晶格	190
5.1.4 界面展宽效应	195
5.1.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的光学声子散射	197
§ 5.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱的发光特性	201

5.2.1	Si、Ge 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的带边发光谱	201
5.2.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱的带边发光	208
5.2.3	Si_nGe_m 短周期超晶格的发光特性	214
5.2.4	结构的非均匀起伏和无序效应	217
§ 5.3	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结构的吸收、调制反射和非线性光谱	220
5.3.1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱的子带间吸收	220
5.3.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结的内光电发射	226
5.3.3	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结构的调制反射光谱	226
5.3.4	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格的二次谐波产生	228
第 6 章	Si 基 Ge 量子点材料	233
§ 6.1	Si 基 Ge 量子点材料的生长、表征及其发光特性	234
6.1.1	生长 Si 基量子点的方法	234
6.1.2	用局域 Si 分子束外延技术生长 Si 基 Ge 量子点	235
6.1.3	自组织生长 Si 基 Ge 量子点	237
6.1.4	Si 基 Ge 量子点的热稳定性	241
§ 6.2	Si 基 Ge 量子点的能级结构和库仑荷电效应	243
6.2.1	量子点的能级结构和库仑荷电效应	243
6.2.2	Si 基 Ge 量子点的导纳谱理论	245
6.2.3	Si 基 Ge 量子点样品的导纳谱分析	249
§ 6.3	Si 基 Ge 量子点的空穴俘获过程的研究	253
6.3.1	量子点中载流子俘获的暂态过程	253
6.3.2	用 DLTS 技术测量 Ge 量子点的能级结构	254
6.3.3	Ge 量子点中空穴俘获过程的观察	257
第 7 章	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 分子束外延材料的器件应用	260
§ 7.1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区 HBT	260
7.1.1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区对提高 Si 基双极型晶体管高频特性的作用	260
7.1.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区 HBT 器件制造工艺	262
7.1.3	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 基区 HBT 的低温特性	265
§ 7.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 埋沟 MOS 场效应管	265

7.2.1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 埋沟 MOS 场效管的特点	265
7.2.2	迁移率增强效应和调制掺杂	266
7.2.3	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ MOSFET 的结构与特性	268
§ 7.3	$\text{p}^+-\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结内光电发射型红外探测器	269
7.3.1	$\text{p}^+-\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结内光电发射效应	270
7.3.2	$\text{p}^+-\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结内光电发射器件参数的选择	271
7.3.3	器件特性的模拟	274
7.3.4	$\text{p}^+-\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结内光电发射型红外探测器的制作	277
§ 7.4	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱型探测器	281
§ 7.5	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光电集成电路	283
索引		287

第1章 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 合金 应变层及超晶格的基本性质

§ 1.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层内的应力

外延生长异质材料时首先要考虑的是两种材料的晶格匹配问题。晶格常量不同的两种材料如果以各自原来的晶格排列,那么在界面处就会有很多晶格错位,形成失配位错。 Si 和 Ge 的晶格常量分别为 0.357 nm 和 0.357 nm ,晶格失配率高达 4.2% ,属于大失配体系。因此在 Ge 和 Si 的界面处,失配位错密度极高。失配位错是线位错,位错不可能在晶体中间开始和终止,加上失配位错的长度只能是有限的,因此失配位错的两端不是形成一个闭合位错环,就是通过一对螺位错延伸到自由表面。在 Si 上直接生长厚 Ge 层,其位错密度将远远超过任何器件所能容忍的限度。

Si 和 Ge 的合金记为 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金,其中 x 是 Ge 的组分, x 永远小于 1。有时 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金也简写为 SiGe (合金)。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的晶格常量随合金中 Ge 的组分 x 增大而单调上升,但总是处在纯 Ge 和纯 Si 的晶格常量之间。无应变的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶格常量 a_{SiGe} 随组分 x 的变化可用线性内插法求得^[1]。

$$a_{\text{SiGe}} = a_{\text{Si}} + (a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})x = 0.357 + 0.0227x \quad (\text{nm}) \quad (1-1)$$

因此 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金与 Si 的晶格失配率随合金组分 x 而改变,失配率可表达为式(1-2)。

$$f = (a_{\text{SiGe}} - a_{\text{Si}})/a_{\text{Si}} = 0.042x \quad (1-2)$$

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的晶格常量总是小于纯 Ge 的晶格常量,因此在 Si 衬底上生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层时遇到的晶格失配问题要比生长纯 Ge 小得多。但即使在 Si 衬底上生长 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 合金层(Ge 组分 x 为 0.3),只要生长条件控制不当,在界面处的螺位错密度也会高达 $10^8 \sim 10^9/\text{cm}^2$ 。

Osborn^[2] 提出的应变层超晶格(strained layer superlattice, SLS)概念同样适用于在 Si 衬底上外延生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层:只要 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金外延层足够薄,即其厚度小于某一个值(称为临界厚度)时,晶格失配可以完全由外延层的应变来补偿,从而可获得无界面失配位错的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层^[3]。在这种情况下, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层在平行于界面方向上受到压应力,使平行于界面方向上的合金层的晶格常量 $a_{\parallel}$ 与 Si 衬底保持相同,即 $a_{\parallel} = a_{\text{Si}}$;而在生长方向上, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层受到张应力,使合金层在垂直于生长方向上的晶格常量 $a_{\perp}$ 增大,以保持体系总应变能最小。这种不产生失配位错的应变层外延生长模式称为共度生长或赝形生长。前面提到的外延层以自身的晶格常量排列的生长方式称为非共度生长。

图 1-1 为在 Si(100)衬底上生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层的原子排列示意图。

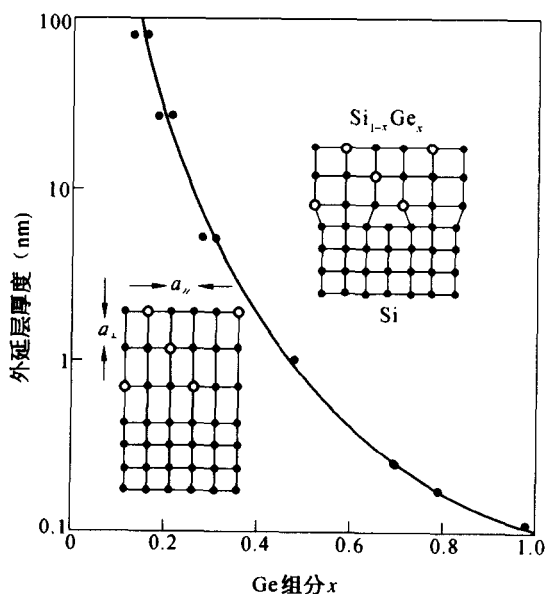


图 1-1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层在 Si(100)衬底上共度生长和非共度生长时的原子排列示意图